

深部钻探极端环境下金刚石钻头工作特性 与失效机制研究进展与展望

王 铭^{1,2,3}, 徐 良^{1,2,3}, 徐绍涛^{1,2,3*}, 尹宇森^{1,2,3}, 窦世超^{1,2,3}, 祝兴超^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 金刚石钻头在深部钻探高温、高压、高研磨、强腐蚀及多场耦合极端环境下的工作性能面临严峻挑战。本文系统梳理了PDC钻头与孕镶金刚石钻头在上述环境下的工作特性与失效机制。结果表明: 高温环境下PDC钻头以热损伤与界面剥离为主, 孕镶金刚石钻头表现为胎体软化和金刚石热损伤; 高压环境下PDC钻头易发生切削齿断裂与分层剥离, 孕镶金刚石钻头则出现胎体变形与金刚石脱落; 高研磨环境下两类钻头均遭受磨粒磨损与振动疲劳的协同失效; 腐蚀环境下PDC钻头发生化学溶解与微电偶腐蚀, 孕镶金刚石钻头以黏结相选择性溶蚀为主, 腐蚀-磨损协同作用显著加速材料流失; 多场耦合使各损伤机制相互促进, 产生非线性放大效应。相应地, 分别可通过水力结构优化与耐热材料改性、异形齿与射流辅助、仿生结构与超耐磨胎体、组分优化与表面涂层、梯度结构设计等来延长钻头寿命或提高破岩效率。未来应重点深化多场耦合机理研究、推进极端环境专用材料的工程验证、发展智能钻头技术, 支撑深部极端环境钻探技术的迭代升级。

关键词: 深部钻探; 极端环境; PDC钻头; 孕镶金刚石钻头; 工作特性; 失效机制; 多场耦合; 智能钻头

中图分类号: P634.4⁺1; TE921⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0066-13

Research progress and prospects on working characteristics and failure mechanisms of diamond drill bits under extreme environments in deep drilling

WANG Ming^{1,2,3}, XU Liang^{1,2,3}, XU Shaotao^{1,2,3*}, YIN Yusen^{1,2,3}, DOU Shichao^{1,2,3}, ZHU Xingchao^{1,2,3}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: The working performance of diamond drill bits faces severe challenges under extreme deep-drilling environments characterized by high temperature, high pressure, high abrasiveness, strong corrosion, and multi-field coupling. This paper systematically reviews the working characteristics and failure mechanisms of PDC bits and impregnated diamond bits under the aforementioned environments. The results indicate that: under high-temperature conditions, PDC bits primarily suffer from thermal damage and interfacial delamination, while impregnated bits exhibit matrix softening and thermal damage to diamond; under high-pressure conditions, PDC bits are prone to cutter fracture

收稿日期: 2026-04-20; 修回日期: 2026-06-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.007

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000906); 国家自然科学基金项目(编号: U25B201409、U23A2025); 中央高校新教师基本科研能力提升项目(编号: 2652025021)

第一作者: 王铭, 男, 汉族, 2002年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为钻头材料与结构, 北京市海淀区学院路29号, 18238445653@163.com。

通信作者: 徐绍涛, 男, 汉族, 1995年生, 讲师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事深地、深海钻探工艺与机具及非常规能源勘探与开发等方面的工作, 北京市海淀区学院路29号, xust815@163.com。

引用格式: 王铭, 徐良, 徐绍涛, 等. 深部钻探极端环境下金刚石钻头工作特性与失效机制研究进展与展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 66-78.
WANG Ming, XU Liang, XU Shaotao, et al. Research progress and prospects on working characteristics and failure mechanisms of diamond drill bits under extreme environments in deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 66-78.

and delamination, whereas impregnated bits undergo matrix deformation and diamond particle shedding; under highly abrasive conditions, both types of bits experience synergistic failure caused by abrasive wear and vibration fatigue; under corrosive conditions, PDC bits undergo chemical dissolution and micro-galvanic corrosion, whereas impregnated bits mainly exhibit selective dissolution of the binder phase, and the corrosion-wear synergy significantly accelerates material loss; multi-field coupling promotes mutual reinforcement among various damage mechanisms, producing a nonlinear amplification effect. Correspondingly, the service life of drill bits can be extended or the rock-breaking efficiency can be improved through hydraulic structure optimization and heat-resistant material modification, shaped cutters with jet assistance, bionic structures and ultra-wear-resistant matrices, composition optimization and surface coating, as well as gradient structure design. Future research should focus on deepening the research on multi-field coupling mechanisms, promoting the engineering validation of extreme-environment-specific materials, and developing intelligent drill bit technologies, thereby supporting the iterative upgrades of drilling technologies for extreme deep-earth environments.

Key words: deep drilling; extreme environment; PDC drill bit; impregnated diamond drill bit; job characteristics; failure mechanism; multi-field coupling; intelligent drill bit

0 引言

在全球能源需求持续增长与浅层能源日益枯竭的背景下,深部油气的勘探开发已成为保障国家能源安全的重要战略方向,但深部地层普遍面临高温高压等极端环境的严峻挑战^[1-2]。为此,我国持续推进深地深海战略,作为突破极端环境能源开发的关键手段,钻探技术正加速向深地及深海拓展。例如,塔里木盆地、四川盆地等超深层储层埋深普遍超过8000 m,地层温度150~210℃,围压100~180 MPa,高温、高压、高研磨、强腐蚀相互耦合,形成极端复杂的井下工况,对钻探装备的性能提出了前所未有的严苛要求^[3-4]。在此背景下,钻探工具特别是钻头的性能是决定深部钻探效率与成败的关键。金刚石钻头凭借其高硬度、优异耐磨性与化学稳定性,成为极端地层钻探的核心破岩工具,其性能直接影响钻进效率、工程成本与作业安全^[5]。

目前常用的金刚石钻头主要有PDC钻头和孕镶金刚石钻头两大类^[6]。其中,PDC钻头以切削齿剪切破岩为主,碎岩效率较传统钻头大幅提升,是超深层油气钻井的主力工具^[7];孕镶金刚石钻头主要依靠胎体有序磨损致使金刚石出刃磨削岩石,适用于极硬、高研磨地层^[8]。常规金刚石钻头在极端环境下存在热稳定性不足、抗冲击性差、磨损失效快等问题。我国在万米特深井工程中虽已实现PDC钻头、孕镶金刚石钻头的国产化突破,但极端环境适配性仍与国际先进水平有一定差距^[3-4]。为此,亟需围绕材料、结构、制备工艺及智能化等方向开展适应极端环境金刚石钻头的系统研发,推动新一代钻头向耐高温、耐高压、智能化等方向发展^[7,9]。

本文系统总结了深部钻探极端环境下金刚石钻头的工作特性与失效机制。首先界定了极端环境的范畴,梳理了PDC钻头与孕镶金刚石钻头的应用性能。在此基础上,阐明了高温、高压、高研磨、强腐蚀及耦合环境下金刚石钻头性能衰减规律与界面劣化特征,对比了单一与耦合工况下的热损伤、过载断裂、磨粒磨损、电化学腐蚀等失效机制,进而总结了不同环境下钻头的破岩效率、磨损特性等工作特性差异。最后指出现有研究在多场耦合机理、失效机制体系化认知、新型材料验证及智能化等方面的不足,并提出了未来发展方向。本研究可为极端环境高性能金刚石钻头设计优化与工程应用提供参考借鉴。

1 极端环境金刚石钻头工作性能

深部钻探极端环境按主导因素可分为高温、高压、高研磨、强腐蚀等,实际工况往往以多场耦合形式存在,如表1所示。高温环境局部切削区可超过800℃,PDC钻头易发生热损伤与界面剥离,导致耐磨性骤降,而孕镶金刚石钻头则面临胎体软化和金刚石热损伤,使其胎体强度先升后降^[10]。高压环境围压高达200 MPa,PDC钻头切削齿易断裂、分层剥离,通过异形齿设计可提升其破岩效率;孕镶金刚石钻头易发生胎体变形与金刚石颗粒脱落,抗压变形能力仍较弱^[11-14]。高研磨环境以高石英砂岩为代表,两类钻头均遭受磨粒磨损与热磨损,其中PDC钻头通过仿生耦合或环形槽双钻头可大幅提升寿命与钻速,孕镶金刚石钻头则需超耐磨胎体与高浓度金刚石以延缓过早脱落^[15-18]。腐蚀环境由H₂S、CO₂及高矿化度盐水构成,PDC钻头易发生化学溶解与

微电偶腐蚀,孕镶金刚石钻头则表现为黏结相选择性溶蚀及胎体强度下降,腐蚀与磨损协同作用显著加速材料流失^[19-23]。多因素协同作用使钻头失效风险呈指数级上升。

表1 极端环境下PDC钻头与孕镶金刚石钻头性能对比

Table 1 A comparison of the performance of PDC and impregnated diamond drill bits under extreme conditions

环境类型	环境参数	钻头类型	性能特征	失效模式	应对技术
高温	井底 150~210 ℃ (局部切削区 >800 ℃)	PDC 钻头	耐磨性骤降,界面弱化	热损伤、界面剥离	扁平长水眼冷却、材料改性
		孕镶金刚石钻头	胎体强度先升后降	胎体软化、金刚石热损伤	陶瓷空心微球增强胎体、耐热胎体
高压	围压 100~200 MPa	PDC 钻头	异形齿破岩效率高	切削齿断裂、分层剥离	V 形齿/斧形齿、高压 CO ₂ 射流
		孕镶金刚石钻头	抗压变形能力弱	胎体变形、金刚石颗粒脱落	胎体强化、界面优化
高研磨	石英含量高,颗粒莫氏硬度 > 6.5	PDC 钻头	寿命、钻速大幅提升	磨粒磨损、热磨损	仿生耦合、环形槽双钻头
		孕镶金刚石钻头	钻速、寿命较大提升	胎体过度磨损、金刚石过早脱落	超耐磨胎体、高浓度金刚石
强腐蚀	H ₂ S、CO ₂ 、高矿化度盐水	PDC 钻头	表面状态改变,摩擦升高	化学溶解、微电偶腐蚀	类金刚石涂层、TiC 替代 WC
		孕镶金刚石钻头	腐蚀-磨损协同加速	黏结相选择性溶蚀、胎体强度下降	优化胎体组分、预合金粉体
多场耦合	上述多因素叠加	PDC、孕镶金刚石钻头均适用	热接触电阻降低,温度下降	多机制协同、非线性损伤	梯度结构、锥形金刚石元件

注:表中各项内容的详细文献支撑见正文对应叙述。

1.1 高温环境

高温是深部钻探中导致金刚石钻头性能衰减的首要环境因素,其对钻头性能的影响主要体现在工作特性和失效机制两个方面。工作特性方面,高温会引发钻头材料的力学性能显著衰减,表现为热应力集中、界面结合弱化及抗弯强度先升后降。Han 等^[24]基于热-流-固耦合模型模拟了PDC钻头钻进过程中的温度场与应力场分布,揭示了切削齿温升对内部应力的影响机制,指出切削齿冠顶区域是热应力最为集中的部位。在热传导理论层面,管成凯等^[25]建立了钻头-岩石-岩屑系统的三维导热微分模型,从理论模型、受力分析、产热分析三方面对比了硬质合金与PDC钻头的温升机制。这种热应力集中进一步作用于金刚石层与硬质合金基体界面,研究表明,高温会显著削弱PDC界面结合强度并加剧界面应力集中^[26]。吴海东^[10]通过钻进实验发现孕镶金刚石钻头抗弯强度在100 ℃时提高约10%,350 ℃时降低约10%,呈现先升后降的变化规律,如图1^[10]所示。值得注意的是,孕镶金刚石钻头因金刚石颗粒微切削特性及出刃高度动态变化,其

热力学理论研究进展相对缓慢^[25]。这些力学行为的劣化直接导致了后续的失效过程。

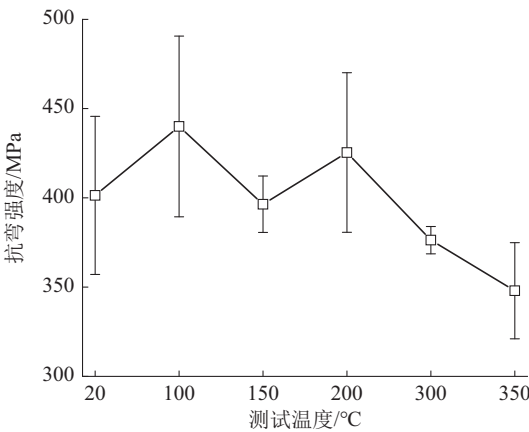


图1 高温实时抗弯强度测试结果^[10]

Fig.1 Results of real-time flexural strength testing at high temperatures

热损伤与界面剥离是高温环境下金刚石钻头的主要失效模式,大量实验与模拟研究从不同方面揭示了这一失效过程。Ma 等^[27]通过热-力耦合条件下的PDC单切削齿磨损实验发现,150 ℃时PDC

切削齿磨损高度比常温高出78%,表明高温和机械载荷共同作用对钻头磨损的加剧效果远超两者单独作用之和。Guo等^[28]利用原位加热冲击磨损试验机进一步研究发现,随温度升高PDC的损伤行为从脆性断裂逐步转变为脆性断裂、黏着磨损、磨粒磨损和氧化磨损的复合模式,其根本原因在于钴黏结

剂与金刚石颗粒之间的热应力失配,如图2^[28]所示。郑少川等^[29]利用原位电镜观测高温下金刚石结构演变,发现温度超过400℃时聚晶金刚石层内部缺陷显著增多,从微观层面揭示了热损伤机理。上述研究表明,高温环境下金刚石钻头的失效模式随温度变化趋于多样化。

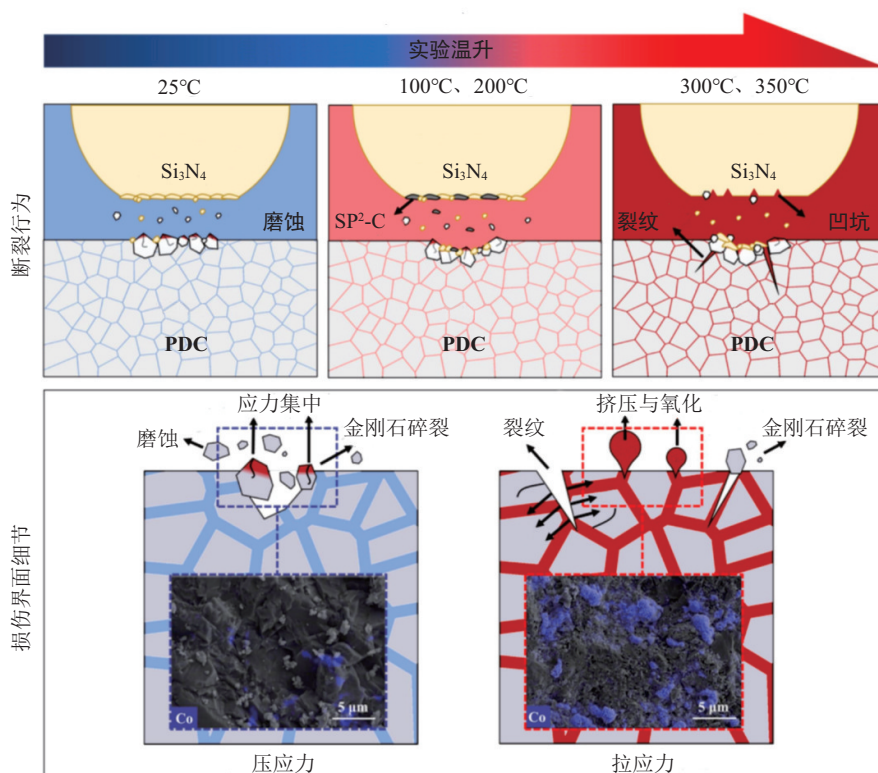


图2 PDC高温冲击磨损机理示意^[28]

Fig.2 Schematic diagram illustrating the mechanism of high-temperature impact wear in PDC

基于上述失效机制,研究者为应对温度对钻速与寿命的影响,从水力结构优化、材料改性与钻进参数匹配等角度提出了多种应对措施。针对高温地热井钻速低、寿命短的技术难题,Ren等^[7]设计了扁平长水眼PDC钻头,通过增加水眼径向覆盖范围扩大直接喷射冷却面积,现场试验表明机械钻速提高35.8%~144.3%,进尺增加173.4%~361.5%。陈西等^[30]发现添加10%钎稳定氧化锆空心球可使胎体冲击韧性和抗弯强度分别提高至3 J/cm²和903.75 MPa,球形孔隙结构增强了胎体表面粗糙度,提高了金刚石钻头在高温下的出刃能力。在耐热胎体材料方面,杨雪嘉等^[31]研究了Ni-Mn电镀层,发现300℃退火1 h后镀层硬度由300 HV提升至640 HV,其钻头寿命是纯

Ni钻头的1.6倍,为孕镶金刚石钻头的高温改性提供了新途径。在钻进参数方面,张治疆^[32]通过岩石力学试验揭示了温度对花岗岩抗压强度、弹性模量等力学性质的影响规律,并指出切削齿倾角、转速、切削深度等参数对破岩效果具有显著作用,为高温钻进参数的合理匹配提供了理论依据。沈立娜等^[33]针对坚硬花岗岩开展了干式钻进试验,发现PDC钻头的升温速率约为常规孕镶金刚石钻头的50%,且在适宜参数下可实现干钻。辛永安等^[34]针对井下高温环境,通过PDC钻头切削齿破岩热分析,揭示了切削深度、切削速度及齿倾角对切削齿温升与破岩效率的影响规律,并基于响应面法给出了最佳参数组合,为高温钻进中钻进参数的合理匹配提供了依据。

综上所述,高温环境下金刚石钻头呈现胎体强度下降、界面弱化、磨损加剧等典型特征。其中,350℃是WC-Co胎体强度显著衰减的阈值,而聚晶金刚石层的热损伤主要发生在700℃以上,这与高温下磨损加剧的特征相对应。力学行为的劣化直接导致以热损伤与界面剥离为主的失效,通过水力结构优化、材料改性与参数匹配可有效延长钻头寿命。然而,目前研究多集中于基体的单一温度阈值和简单水力优化,忽略了实际钻进中温度场的动态变化与切削齿局部热点的随机分布特征。未来应重点研发新型耐热胎体材料与梯度界面结构,同时发展基于瞬态热-力耦合的寿命预测模型,探索梯度热障涂层等主动热防护手段,而非仅依赖被动冷却,以进一步提升高温钻探的可靠性。

1.2 高压环境

随着钻探深度增加,地层围压可达200 MPa,岩石抗压强度大幅提升,同时破坏模式由脆性向塑性转变^[35],导致金刚石切削齿侵入岩石所需的切削力和扭矩成倍增加。如图3^[35]所示,随着围压升高,岩石的偏应力-应变曲线形态出现显著变化:低围压下曲线峰后应力迅速跌落,表现为脆性破坏;高围压下曲线峰后衰减平缓,部分呈现应变硬化现象,表现出明显的塑性特征。这一转变意味着岩石破坏模式由脆性崩碎逐渐过渡为塑性剪切破坏,直接影响了钻头切削单元的破岩效率与受力状态^[35]。Liu等^[12]利用真三轴岩石切削装置开展了围压条件下不同形状PDC切削齿的花岗岩切削实验,发现围压条件下的破岩难度显著高于常压条件,切削力和机械比能均大幅增加。何迁等^[36]系统总结了深部钻探金刚石钻头胎体的发展现状,指出在高压环境下钻头胎体不仅要承受持续的高围压载荷,还要应对地层非均质性带来的交变冲击载荷。赵洪晨等^[13]指出,在高冲击、高围压复合工况下,PDC球形切削齿的失效位置多集中于钎焊界面,表明结合界面是高压环境下的薄弱环节。上述力学响应表明,高围压从根本上改变了岩石的可钻性特征及钻头的受力状态。

过载破裂与界面剥离是高压环境下的主导失效模式,这一失效模式源于应力集中,并最终表现为宏观断裂或剥离。田万顷等^[37]通过围压条件下PDC异形齿切削硅质白云岩的实验发现,随着围压的增大,岩石的破坏前塑性特征显著增强,切削齿受到的径向力和切向力均大幅增加,导致破碎比功

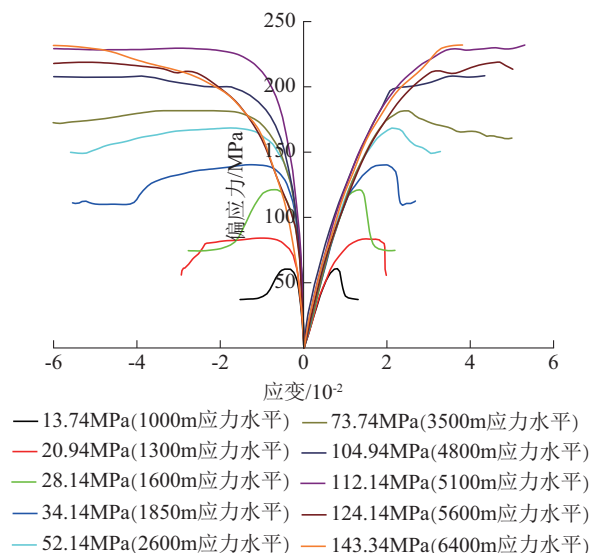


图3 不同围压下1600 m深度砂岩的偏应力-应变曲线^[35]

Fig.3 Deviatoric stress-strain curves of sandstone at a depth of 1600 m under different confining pressures

显著提高。张春亮等^[14]研究了刮切和冲击复合作用下破岩应力分布特性,发现在高压高载荷条件下,PDC切削齿与岩石的接触界面存在显著的应力集中现象,最大主应力集中于切削齿的倒角区域和聚晶金刚石层与硬质合金基体的界面处,当局部应力超过界面结合强度时即会引发金刚石层与基体的界面剥离。赵洪晨等^[13]对潜孔锤钻头PDC球形切削齿的失效形态进行了系统分析,发现在高冲击、高围压的复合工况下,球形切削齿的主要失效形式为切削齿断裂和脱层,如图4^[13]所示,其失效位置多集中于齿冠顶部和钎焊界面。上述研究从宏观切削响应、应力分布到失效形貌,完整揭示了高压环境下钻头的失效演化规律。

上述失效过程为耐高压钻头的针对性设计提供了参考。针对高压环境下金刚石钻头的失效原因,研究者从多个方面提出了应对措施。Detournay等^[38]结合孔隙压力影响,建立了高围压下PDC钻头破岩力学模型,揭示了破岩比功与井底压力、孔隙压力之间的线性关系,并区分了页岩与渗透性砂岩的不同钻井工况,为高压地层钻头设计提供了理论基础。罗鸣等^[11]针对南海西部莺琼盆地超高温高压巨厚泥岩的钻井难题,研发了V形齿PDC钻头,现场应用中平均机械钻速为20.99 m/h,约为邻井常规PDC钻头的2.52倍,验证了异形齿在高压环境下的优越性。陈浩等^[39]开展了高温损伤岩石高压

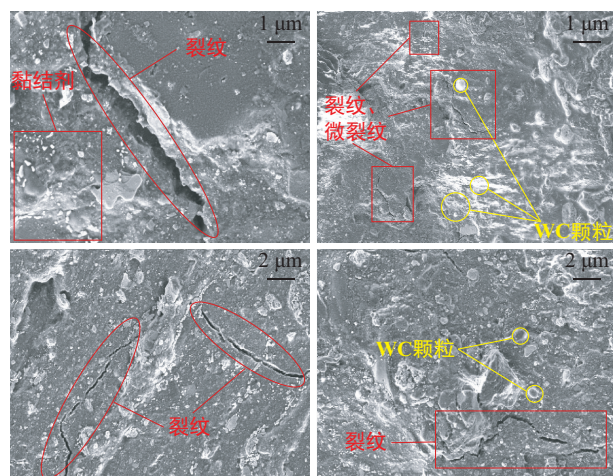
图4 PDC切削齿冲击断裂SEM图像^[13]

Fig.4 SEM impact fracture image of PDC cutter

CO₂射流 PDC 齿联合破岩研究,发现 CO₂射流与 PDC 齿的联合作用可产生协同破岩效应,如图 5^[39]所示,该研究为高温高压地层中水力与机械联合破岩技术提供了新思路。

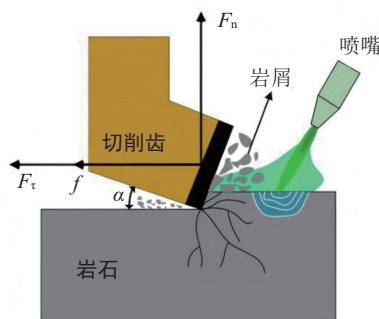
图5 射流与单齿联合切削时 PDC 齿受力示意^[39]

Fig.5 Schematic diagram of forces acting on a PDC cutter during combined jet and single-cutter cutting

总体而言,高压环境下金刚石钻头呈现载荷升高、破岩机理转变、界面应力集中等典型特征,围压升高导致岩石由脆性崩碎向塑性剪切破坏转变,增大了切削齿的过载破裂与界面剥离风险。通过异形齿优化、材料改性及射流辅助破岩可有效提升破岩效率。然而,目前研究多集中于定性对比和单一因素分析,缺乏针对不同岩性及围压条件的异形齿参数优化准则。未来应建立高压多因素耦合实验平台,引入拓扑优化方法设计兼具承载与自锐功能的异形齿结构,同时发展多场耦合数值模拟与智能化调控技术,以进一步提升高压环境下钻探的可靠性。

1.3 高研磨环境

高研磨地层中的硬质矿物颗粒对金刚石钻头产生持续的磨粒磨损,同时伴随着高频振动和摩擦生热,形成“磨损-振动-热”三者相互加剧的恶性循环。Duan 等^[15]量化了研磨颗粒尺寸对切削齿损伤程度的作用规律,揭示了磨粒尺寸越大损伤越严重的正相关关系。杨展等^[40]指出,岩石中的硬质颗粒导致的磨粒磨损是钻头磨损的最主要因素,可导致金刚石颗粒发生脆性断裂与脱落。祝效华等^[16]发现高研磨条件下摩擦生热显著增加,齿顶温度随切削时间持续升高,同时磨损弦长随切削过程逐渐增长,如图 6^[16]所示,导致胎体软化、磨损加快,形成研磨-生热-软化-加速磨损的恶性循环。这些现象表明,高研磨环境的破坏作用并非单一机制,而是磨粒、振动、热三者协同作用的结果。

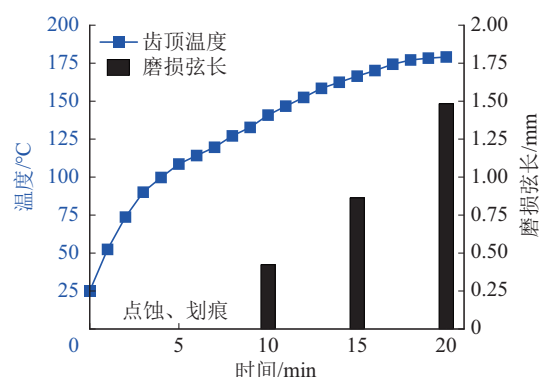
图6 切削过程中切削齿的齿顶温度和磨损弦长^[16]

Fig.6 Tip temperature and wear chord length of drill cutter during cutting

金刚石颗粒损伤与胎体过度磨损是高研磨环境下的两种主要损伤形式,二者相互促进。段隆臣等^[8]从钻头整体、金刚石和金属胎体三个层面,系统梳理了孕镶金刚石的磨损机理与影响因素,指出磨粒对胎体的犁削是损伤的起点。李禹霄等^[41]指出,磨损机制主要包括磨粒磨损、疲劳磨损和冲击磨损,其中磨粒磨损是最主要的损伤形式,不同机制间的交互作用使材料损耗速率远高于单一机制之和。陈炼等^[42]针对含砾高研磨地层的研究指出,硬质颗粒的冲击作用会加剧切削齿的损伤,降低金刚石与胎体之间的界面结合强度,导致金刚石颗粒提前脱落。由此可见,控制磨粒磨损和增强界面结合强度是抑制损伤的核心。

针对高研磨环境的损伤机理,研究者从结构创新和材料优化两个层面提出了应对措施。在结构层面,徐良^[17]将仿生耦合理论引入钻头设计,模仿生物非光滑表面的耐磨特性,使钻头同时具有耐磨和减阻功能,钻进效率和寿命均提高30%以上。Zhang等^[18]设计了环形槽结构双钻头,通过在井底形成岩石脊实现大体积破碎,机械钻速是常规钻头的2.1~5.2倍。Zhao等^[43]设计的爪趾钻头具有自再生结构,使用寿命是常规钻头的1.9倍。Suleiman等^[44]通过创新切削齿研发与设计优化,显著提升了高研磨坚硬地层的钻进效率。此外,吴霞^[45]和冯云春^[46]分别在须家河组难钻进地层和火山岩地层中通过个性化PDC钻头设计,验证了不同齿形设计与切削结构设计对提升钻速和寿命的有效性,如图7^[45]所示。在材料层面,Zhao等^[47]研究了高温高压烧结PDC切削齿的摩擦学行为,发现黏结剂含量较低的样品表现出更优异的耐磨性能。蔡家品等^[6]指出通过采用超细预合金化粉末提升胎体致密性,并结合超耐磨胎体设计增强抗磨能力,从而显著提高钻头的破岩效率和使用寿命。这些调控策略从结构和材料两方面入手,有效缓解了磨粒磨损和振动疲劳,延长了钻头寿命^[48]。

由此可见,高研磨环境下金刚石钻头呈现磨粒磨损主导、振动与热效应协同加剧的典型特征,硬质矿物颗粒导致磨损-振动-热三者相互促进,形成恶性循环。通过仿生耦合结构、环形槽双钻头、爪趾自再生结构等结构创新,以及超耐磨胎体等材料优化,可有效延长钻头寿命。然而,目前仿生结构设计大多停留在表面形态模仿层面,缺乏对摩擦界面动态自愈机理的系统性研究,磨粒磨损与振动疲劳的交互作用尚未量化,导致钻头寿命预测仍依赖于经验判断。未来应加强基于摩擦学与断裂力学耦合磨损模型研究,开发具有梯度硬度分布的新型胎体材料,并探索研究自修复耐磨涂层等主动防护手段,进一步提升在高研磨环境下钻探的可靠性。

1.4 强腐蚀环境

腐蚀对材料的破坏作用主要源于材料内部存在的电位差异,金刚石复合材料也不例外。Xiao等^[20]深入研究了多晶金刚石的电化学腐蚀行为,发现腐蚀会导致PCD表面化学状态改变,进而影响其摩擦行为。通常,晶界区域的原子排列无序、化学

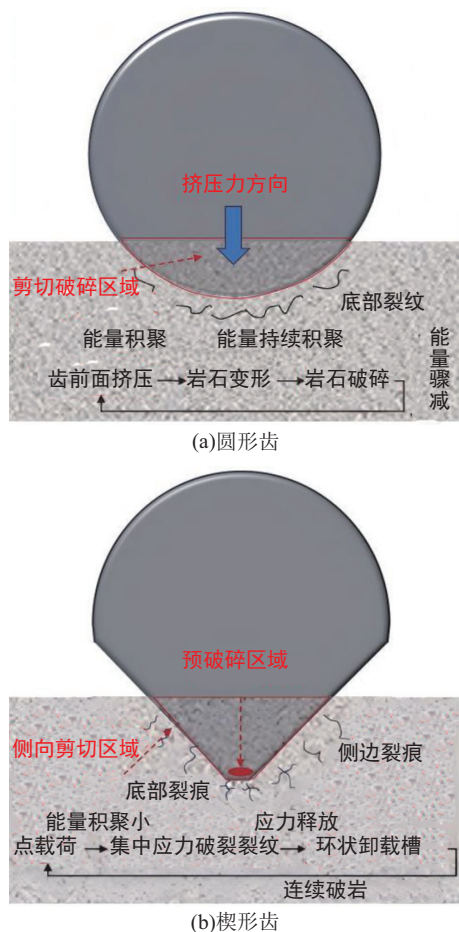


图7 不同齿形破岩机理^[45]

Fig.7 Rock breaking mechanism of different cutter shapes

活性较高,优先发生溶解,形成腐蚀介质向内扩散的通道,进而使晶粒逐渐失去结合而脱落。Balbino等^[19]对比研究了WC-NiMo和WC-Co硬质合金的腐蚀行为,发现黏结剂组分对耐腐蚀性能具有决定性影响,不同金属之间的电位差是形成微电偶的根本原因。刘志江等^[22]研究发现,胎体中的铁等黏结相在盐水环境中易发生选择性化学溶蚀,且不同组分间的电位差会形成微电偶,加速黏结相的优先去除。由此可见,腐蚀的根源在于材料自身微观结构的不均匀性,主要体现在晶界、相界、不同金属接触面,这些地方是腐蚀优先发生的薄弱区域。这些薄弱区域在服役过程中持续遭受腐蚀介质的侵蚀,导致微观损伤不断累积。

微观腐蚀不断累积,逐渐演变为宏观可见的损伤。吕宪义等^[49]发现过渡金属Fe、Ni和Co在含腐蚀介质的条件下会催化金刚石的石墨化反应,并在界面处形成脆性碳化物层,降低金刚石与胎体的结

合强度。潘秉锁等^[21]指出,腐蚀介质与机械载荷的共同作用会产生远高于单一因素的材料流失速率, H_2S 和 CO_2 均可与Co反应生成可溶性盐类,导致黏结相选择性溶蚀。谢北萍等^[50]发现胎体材料冲蚀磨损是由机械冲刷和电化学腐蚀共同引起的,且二者之间存在显著的协同作用,对胎体材料的破坏尤为突出。宏观上,钻头的失效主要表现为胎体强度下降、界面结合削弱、切削齿表面出现腐蚀坑,最终导致整体失效。

针对腐蚀的微观根源和宏观表现,研究者构建了从材料内部到表面的多级防护体系。第一级是胎体组分优化,从源头减少易腐蚀相,通过调整合金成分降低材料本身的电化学活性。刘志江等^[22]研究了WC、Fe、663Cu等组分的影响,指出随着胎体耐腐蚀性的减弱,腐蚀与磨损的协同作用更加显著,如图8^[22]所示,因此优化胎体组分是提升抗腐蚀能力的有效途径。第二级是敏感材料替换,采用耐腐蚀性更强的硬质相替代易腐蚀相,利用其表面形成的致密钝化膜阻隔腐蚀介质。Wang等^[23]发现用TiC或 Cr_3C_2 替代WC可改善复合材料的耐腐蚀性能,TiC和 Cr_3C_2 表面形成的 TiO_2 和 Cr_2O_3 钝化膜是其耐腐蚀性能提升的关键。第三级是表面涂层隔离,在钻头表面沉积惰性涂层,物理隔绝腐蚀环境,并降低摩擦系数。Hincapie-Campos等^[51]发现PDC切削齿在腐蚀环境下表现出优于TCI硬质合金齿的耐腐蚀性能,类金刚石涂层可作为钻头体表面防护的低成本替代方案^[52-53]。江新洪等^[54]指出,在有腐蚀性的泥浆中设计和选用钻头时必须同时考虑材料的抗冲刷磨损性能和抗腐蚀性能。组分优化、材料替代和表面涂层这三级防护层层递进,共同形成了一套完整的金刚石钻头抗腐蚀保护方案。

因此,腐蚀环境下金刚石钻头呈现胎体强度下降、界面结合削弱、切削齿表面腐蚀等典型特征,腐蚀-磨损协同作用和微电偶效应是材料流失的主要机制。通过胎体组分优化、敏感材料替换及表面涂层隔离等多级防护体系,可有效提升钻头的抗腐蚀性能。然而,现有防护手段仍以被动阻隔为主,缺乏主动响应能力。未来应发展具有环境响应性的智能防护涂层与自修复材料,同时推进模拟井下多因素协同腐蚀实验方法的标准化,以更准确地评估材料的耐蚀性能。

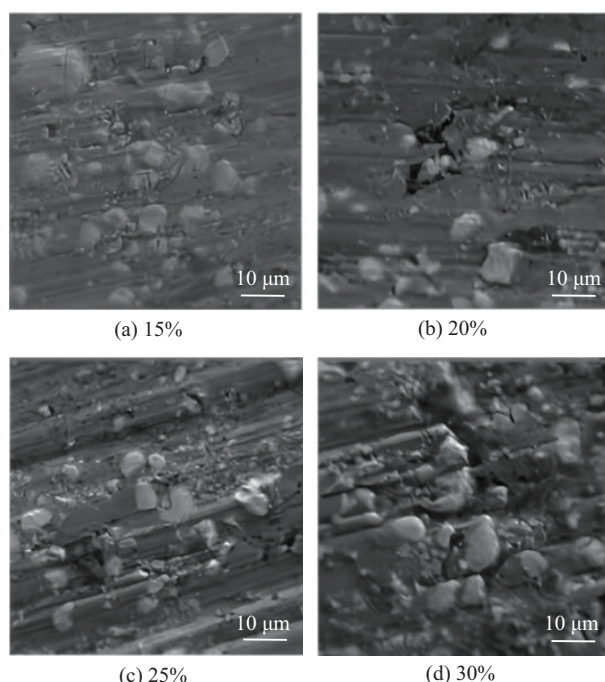


图8 不同WC质量分数胎体试样腐蚀磨损SEM图^[22]

Fig.8 SEM images of corrosion and wear on matrix samples with different mass fractions of WC components

1.5 多场耦合环境

耦合极端环境并非单一环境的简单叠加,而是高温、高压、高研磨、强腐蚀与振动等多种因素同时存在、相互交织。Vega-Ortiz等^[55]通过有限元模拟发现,高温与振动耦合会显著降低PDC切削齿的耐磨性能,增加失效风险。Zhang等^[56]分析了PDC钻头破岩过程中的温度场与热应力场,发现等效应力随温度升高先增后减,在100℃附近达到峰值,体现了热与机械载荷的共同作用。这些研究表明,双因素耦合已表现出比单一因素更为复杂的损伤特征。

不同损伤机制之间的交互作用会产生非线性的放大效应。李禹霄等^[41]发现,在高转速、高钻压和高研磨地层的耦合条件下,磨损机制从单一的磨粒磨损转变为磨粒磨损、疲劳磨损和冲击磨损的复合模式,不同机制间的交互作用使材料损耗速率远高于单一机制之和。潘秉锁等^[21]指出,孕镶金刚石钻头胎体材料的腐蚀与磨损存在显著的协同作用,在耦合环境下材料流失速率远高于单一因素作用之和。此外,祝效华等^[16]建立的热-流-固三场耦合模型揭示了温度、钻井液流动与钻头结构在高研磨性地层中的交互作用,表明多场耦合下钻头温升与磨损呈正反馈关系。Xue等^[57]进一步发现,在高温

钻井液环境下,PDC材料的磨损、氧化与氯离子腐蚀存在多机制协同效应,加剧了材料流失。由此可见,多因素共同作用所导致的损伤远大于单一因素损伤之和,存在明显的协同加剧效应。

针对耦合环境的复杂性,研究者从多个方面提出了系统性的解决方案。在结构设计方面,Wu等^[58]引入成分分级的中间层,形成梯度结构,使界面热接触电阻降低,热平衡温度降低25%,有效抑制了热与机械耦合作用下的局部过热和界面剥离,如图9^[58]所示。Muhammad Shafiq等^[59]开发的锥形

金刚石元件钻头,在高温、高压、高研磨三因素耦合的硬质碳酸盐岩地层中,单只钻头即可完成整个井段,节省15 h钻井时间。在材料优化方面,刘志江等^[22]发现了合理的胎体组分配比可缓解腐蚀与磨损耦合下的协同劣化。陈朝然^[60]通过添加石墨烯、立方氮化硼等增强相,并优化非平面界面结构,显著减少了热与力耦合下的残余应力,提高了PDC在耦合环境下的抗失效能力。上述措施涉及结构创新与材料优化,为应对耦合极端环境的钻头设计提供了参考。

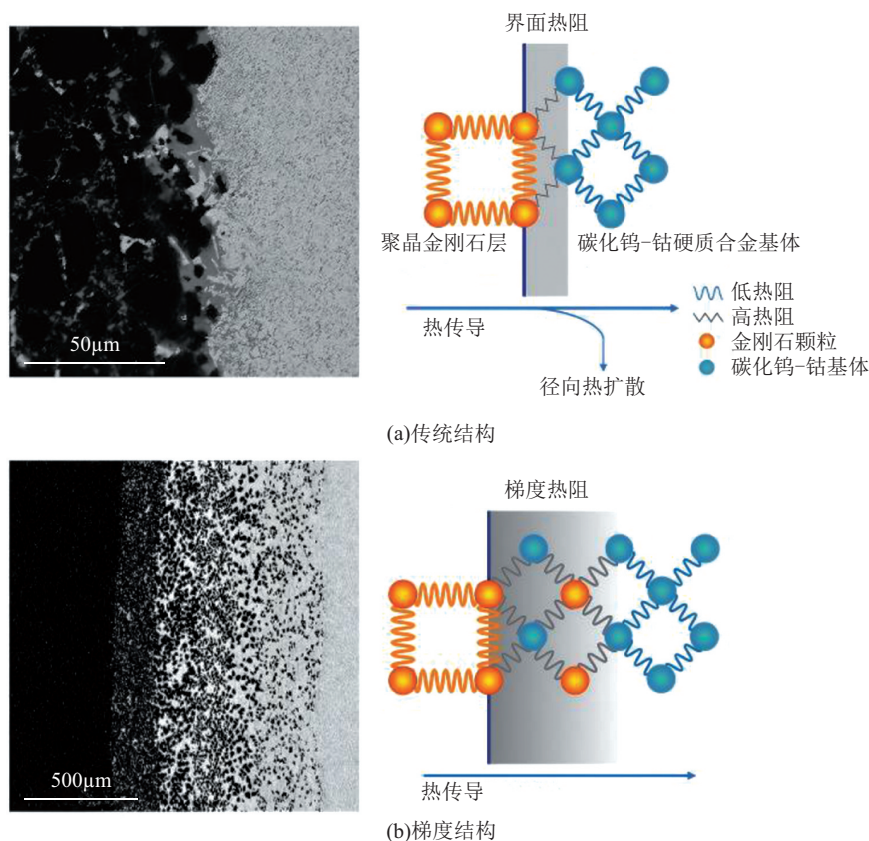


图9 切削齿界面上的热传输机制^[58]

Fig.9 Heat transfer mechanisms at the cutting edge interface

综上所述,多场耦合环境下金刚石钻头呈现多因素协同劣化、非线性损伤放大的典型特征,高温-高压-高研磨-腐蚀-振动的相互作用使失效风险急剧上升。通过梯度结构、锥形金刚石元件等创新设计,以及多场耦合数值模拟等方法,可有效提升金刚石钻头在耦合环境下的服役可靠性。然而,现有研究多局限于双因素或三因素耦合,缺少多场同时作用的系统研究。未来应发展基于机器学习的多

目标优化算法,并结合数字孪生技术实现井下极端环境钻头服役状态的实时诊断与自适应调控。

2 核心挑战与发展方向

2.1 核心挑战

尽管近年来国内外学者在极端环境下金刚石钻头的工作特性与失效机制及应对措施等方面取得了显著进展,形成了系列化工具与相应工艺,但

面对日益复杂的勘探开发环境与更高的技术要求,仍面临以下核心挑战。

(1)多场耦合失效机理认知不足,缺乏精准的力学响应模型。深部钻探实际工况是高温、高压、高研磨、强腐蚀等多因素共同叠加的耦合极端环境,多因素协同作用会产生非线性叠加损伤效应,其劣化程度远高于单一环境。然而,现有研究多聚焦于单一极端环境,对多场耦合环境下金刚石层与硬质合金基体的应力传递规律、热-流-固三场耦合对切削齿温度分布的影响机制等研究仍不充分,缺乏精准的多场耦合力学响应模型,导致钻头设计难以准确匹配实际工况需求。

(2)现有金刚石钻头存在固有短板,工作性能难以满足多场景需求。PDC钻头在高温环境下初期效率高但寿命短,超过临界温度后磨损速率急剧上升^[61];孕镶金刚石钻头虽在高研磨环境下稳定性更优,但初始钻速较低;仿生耦合钻头、梯度结构PDC等新型钻头在极端工况下的长期服役性能缺乏充分的现场工程验证。不同钻头类型各有适用场景,单一钻头难以同时满足高温、高压、高研磨、强腐蚀等多重极端环境的复合要求。

(3)井下极端环境探测困难,工程经济性难以兼顾。在深地、深海等极端环境下,钻头材料面临着高温、高压、高研磨、强腐蚀等多重严苛挑战,对其耐温、耐压、抗腐蚀、抗研磨性能提出极高要求^[4,21],而井下随钻测量技术尚不成熟,难以实时获取钻头附近的温度、应力、振动等关键参数;智能钻头技术仍处于探索阶段,缺乏基于人工智能的井下工况自适应调控、实时失效预警技术^[9]。此外,非常规地质能源的大规模开发则需要兼顾钻进效率与作业成本的技术。

2.2 发展方向

针对上述三大核心挑战,提出以下对应的发展方向。

(1)深化多场耦合机理研究。重点开展“高温-高压-研磨-腐蚀”多场耦合环境下金刚石钻头的力学行为研究,构建“热-流-固-化”四场耦合数值模拟平台,建立精准的多场耦合力学响应模型。同时发展原位表征技术,实现在动态服役条件下对金刚石-胎体界面演化、微裂纹萌生与扩展的实时观测,为材料设计与结构优化提供依据。

(2)提升钻头工作性能。针对现有钻头在高

温、高压、高研磨、强腐蚀等单一或多种环境下的性能短板,从结构优化、材料改性、与工艺改进等多方面入手,全面提升钻头的工作性能。重点发展异形齿与仿生结构设计、超耐磨胎体与耐热材料、梯度界面与涂层防护等技术,提高钻头的破岩效率、耐磨性与使用寿命,弥补单一钻头难以适应多场景需求的不足。

(3)发展随钻测量与智能化技术,兼顾工程经济性。研发耐高温高压的嵌入式传感器与信号传输系统,实现钻头附近温度、应力、振动等参数的实时随钻测量,解决井下极端环境探测难题。在此基础上,建立基于机器学习的钻头失效预警与寿命预测模型,开发可根据井下工况自适应调整切削齿角度、水力参数及钻进规程的智能钻头技术。通过“感知-决策-执行”闭环提升钻头在极端环境下的主动适配能力,从而兼顾钻进效率与作业成本。

3 结论

(1)深部钻探高温、高压、高研磨、强腐蚀及多场耦合环境下,PDC钻头与孕镶金刚石钻头呈现差异化的失效特征。高温环境下,PDC钻头以热损伤与界面剥离为主,孕镶金刚石钻头以胎体软化和金刚石热损伤为主;高压环境下,PDC钻头易发生切削齿断裂与分层剥离,孕镶金刚石钻头表现为胎体变形与金刚石颗粒脱落,破岩效率随围压升高而降低;高研磨环境下,PDC与孕镶金刚石钻头均面临磨粒磨损与振动疲劳的协同失效;腐蚀环境下,PDC钻头发生化学溶解与微电偶腐蚀,孕镶金刚石钻头以黏结相选择性溶蚀为主,腐蚀-磨损协同作用显著加速材料流失。多场耦合环境下,各损伤机制相互促进,产生非线性放大效应,失效风险急剧上升,其中金刚石-胎体界面是各类工况下的主要薄弱环节。

(2)针对上述失效模式,可采取以下技术对策。高温工况下,通过水力结构优化与耐热材料改性延长钻头寿命;高压环境下,采用异形齿设计与超高压射流辅助提升破岩效率;高研磨地层中,引入仿生耦合结构及超耐磨胎体增强耐磨性;腐蚀环境下,构建胎体组分优化、敏感材料替换、表面涂层隔离的多级防护体系;多场耦合工况下,采用梯度结构与锥形金刚石元件等新型设计,结合多场耦合数值模拟与智能化调控,提升钻头服役可靠性。

(3)我国金刚石钻头技术已在万米特深井工程中取得突破,但在多场耦合失效机理认知、新型耐高温耐蚀材料工程化验证、智能钻头技术研发等方面仍存在不足。未来需重点深化多场耦合机理研究,推进极端环境专用材料的工程验证,发展智能钻头与随钻测量技术,以支撑深部极端环境钻探技术的迭代升级。

参考文献(References):

- [1] 孙友宏,徐良,薛启龙,等.海洋深层钻井关键理论与技术发展现状及展望[J].石油钻探技术,2025,53(3):1-10.
SUN Youhong, XU Liang, XUE Qilong, et al. Current status and prospects of key theories and technologies for marine deep drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(3): 1-10.
- [2] Beckwith R. Drilling in extreme environments: space drilling and the oil and gas industry[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(9): 56-66.
- [3] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等.深井超深井油气钻井技术进展与展望[J].天然气工业,2021,41(8):163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [4] 刘岩生,张佳伟,黄洪春.中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J].石油学报,2024,45(1):312-324.
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.
- [5] 刘清友,杨迎新,田红平,等.复杂难钻条件下高效个性化钻头研发与应用[Z].成都:成都理工大学,2019.
LIU Qingyou, YANG Yingxin, TIAN Hongping, et al. Development and application of high-efficiency personalized drill bits under complex and difficult drilling conditions[Z]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [6] 蔡家品,贾美玲,沈立娜,等.难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):67-73,91.
CAI Jiapin, JIA Meiling, SHEN Lina, et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(2): 67-73, 91.
- [7] Ren H T, Jia X, Yang Y X, et al. Personalized design and field experiment of polycrystalline diamond compact bits for high-temperature geothermal wells[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 223: 211512.
- [8] 段隆臣,孙武成,王志明,等.孕镶金刚石钻头磨损研究现状与发展趋势[J].地质科技通报,2024,43(3):200-217.
DUAN Longchen, SUN Wucheng, WANG Zhiming, et al. Research status and development trend on wear of impregnated diamond bits[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 200-217.
- [9] 李昌盛,孙华凯,张乐.基于物理约束机器学习的PDC钻头智能选型技术研究[J].钻采工艺,2026,49(1):133-140.
LI Changsheng, SUN Huakai, ZHANG Le. Research on intelligent selection technology of PDC bits based on physics-constrained machine learning[J]. Drilling & Production Technology, 2026, 49(1): 133-140.
- [10] 吴海东.高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D].长春:吉林大学,2017.
WU Haidong. Experimental study on diamond bit drilling under high temperature conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [11] 罗鸣,朱海燕,刘清友,等.一种适用于超高温超高压塑性泥岩的V形齿PDC钻头[J].天然气工业,2021,41(4):97-106.
LUO Ming, ZHU Haiyan, LIU Qingyou, et al. A V-cutter PDC bit suitable for ultra-HTHP plastic mudstones[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 97-106.
- [12] Liu W J, Deng H X, Zhu X H, et al. Experimental study of the rock cutting mechanism with PDC cutter under confining pressure condition[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(10): 7377-7396.
- [13] 赵洪晨,孟德忠,徐良,等.潜孔锤钻头PDC球形切削齿失效分析[J].钻探工程,2025,52(3):117-125.
ZHAO Hongchen, MENG Dezhong, XU Liang, et al. Failure analysis of PDC spherical cutter for DTH hammer bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 117-125.
- [14] 张春亮,丁海林,杨迎新,等.刮切和冲击复合作用下破岩应力分布特性及破岩规律[J].天然气工业,2026,46(1):116-128.
ZHANG Chunliang, DING Hailin, YANG Yingxin, et al. Distribution characteristics of rock-breaking stress and rock-breaking pattern under the joint action of scraping and impact[J]. Natural Gas Industry, 2026, 46(1): 116-128.
- [15] Duan Z Z, Yue W, Tang T, et al. Effects of abrasive particles on the kinetic response and damage behavior of PDC cutters[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 250: 213841.
- [16] 祝效华,李聪,刘伟吉,等.强研磨性地层中PDC钻头井底热-流-固三场耦合研究[J].工程设计学报,2022,29(4):446-455.
ZHU Xiaohua, LI Cong, LIU Weiji, et al. Study on bottom hole thermal-fluid-solid coupling of PDC bit in strong abrasive formation[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(4): 446-455.
- [17] 徐良.硬岩钻进用仿生耦合金刚石取心钻头研究[D].长春:吉林大学,2009.
XU Liang. Research on bionic coupling diamond coring bits in drilling hard rock[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [18] Zhang C, Gao K, Lv X S, et al. Experimental study on the rock-breaking mechanism of annular-grooved structure and rotary direction for impregnated diamond bits[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 249: 213812.
- [19] Balbino N A N, Corrêa E O, Huanca D R, et al. Comparative study of corrosion behaviors of WC-NiMo and WC-Co cemented carbides[J]. Materials, 2023, 16(12): 4480.
- [20] Xiao C, Peng L, Leriche C, et al. Capillary adhesion governs the friction behavior of electrochemically corroded polycrystalline diamond[J]. Carbon, 2023, 205: 345-352.
- [21] 潘秉锁,杨洋,段隆臣,等.孕镶金刚石钻头胎体材料的腐蚀磨损特性及机理研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2023.

- PAN Bingsuo, YANG Yang, Duan Longchen, et al. Corrosion-Wear Characteristics and Mechanism of Impregnated Diamond Bit Matrix Materials[M]. Wuhan: The Press of the China University of Geosciences, 2023.
- [22] 刘志江,姚远基,王文正,等.胎体组分对热压孕镶金刚石钻头胎体腐蚀磨损性能的影响[J].金刚石与磨料磨具工程,2021,41(2):75-81.
- LIU Zhijiang, YAO Yuanji, WANG Wenzheng, et al. Effect of composition on abrasion-corrosion behavior of WC-based matrix material for impregnated diamond bits [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021,41(2):75-81.
- [23] Wang W Z, Zhang C, Zhang Z, et al. Effects of carbides on abrasion-corrosion performance of carbide reinforced composites in saline silica slurries[J]. Wear, 2023,526/527:204949.
- [24] Han X M, Xue L B, Xu J. Influence mechanism of polycrystalline diamond compact bit temperature rise based on thermo-fluid-solid coupling[J]. Science Progress, 2023,106(4):3685042 31214704.
- [25] 管成凯,黄帆,谭松成,等.钻头干钻碎岩过程中的热传导理论分析与研究进展[J].钻探工程,2025,52(6):15-25.
- GUAN Chengkai, HUANG Fan, TAN Songcheng, et al. Theoretical analysis and research progress of heat conduction in the dry drilling and rock breaking process of bits [J]. Drilling Engineering, 2025,52(6):15-25.
- [26] Zhang Z Z, Zhao D J, Zhao Y, et al. Simulation and experimental study on temperature and stress field of full-sized PDC bits in rock breaking process[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,186:106679.
- [27] Ma Y C, You M H, Zhang W L, et al. Research on dynamic wear law of polycrystalline diamond compact (PDC) single cutter under thermal-mechanical coupling[J]. Geoenery Science and Engineering, 2025,247:213673.
- [28] Guo Y Z, Meng D Z, Yue W. Temperature effects on the impact wear performance of polycrystalline diamond compacts: dynamic response analysis and damage mechanism[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2026,136:107574.
- [29] 郑少川,韩俊刚,王悦存.高温下铁-金刚石界面演化机制的原位电镜研究[J].电子显微学报,2025,44(4):406-413.
- ZHENG Shaoshuan, HAN Jungang, WANG Yuecun. In-situ electron microscopy study on the interfacial evolution mechanism between iron and diamond at high temperatures[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2025,44(4):406-413.
- [30] 陈西,沈立娜,杨甘生,等.陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):101-105.
- CHEN Xi, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Effect of ceramic hollow microspheres on the performance of impregnated diamond bits [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):101-105.
- [31] 杨雪嘉,韦秀洁,潘秉锁.耐高温电镀镍锰合金胎体金刚石钻头的钻进性能研究[J].钻探工程,2024,51(4):46-53.
- YANG Xuejia, WEI Xiujie, PAN Bingsuo. Study on drilling performance of heat-resisting electroplated diamond bit with Ni-Mn alloy matrix[J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):46-53.
- [32] 张治疆.高温高压复杂地层PDC钻头切削齿破岩效果研究[D].太原:太原科技大学,2023.
- ZHANG Zhijiang. Study on rock breaking effect of cutting teeth of PDC drill bit in high temperature and high pressure complex strata [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2023.
- [33] 沈立娜,李春,赵义,等.金刚石取心钻头干钻热特性试验研究[J].钻探工程,2025,52(1):62-67.
- SHEN Lina, LI Chun, ZHAO Yi, et al. Experimental study on the thermal characteristics of dry drilling of diamond coring bits [J]. Drilling Engineering, 2025,52(1):62-67.
- [34] 辛永安,付悦,刘家伟,等.PDC钻头切削齿高效破岩热分析及工作参数优化[J].科学技术与工程,2025,25(20):8490-8497.
- XIN Yongan, FU Yue, LIU Jiawei, et al. Efficient rock breaking thermal analysis and optimization of working parameters for PDC drill bit cutting teeth [J]. Science Technology and Engineering, 2025,25(20):8490-8497.
- [35] 谢和平,高明忠,付成行,等.深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J].煤炭学报,2021,46(3):701-715.
- XIE Heping, GAO Mingzhong, FU Chenghang, et al. Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths [J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(3):701-715.
- [36] 何迁,张凯,李禹霄,等.深部钻探金刚石钻头胎体发展现状[J].金刚石与磨料磨具工程,2025,45(5):618-629.
- HE Qian, ZHANG Kai, LI Yuxiao, et al. Development status of deep drilling diamond bit matrix [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2025,45(5):618-629.
- [37] 田万顷,刘伟吉,秦德宏,等.围压条件下PDC异形齿切削硅质白云岩研究[J].石油机械,2025,53(6):84-90.
- TIAN Wanqing, LIU Weiji, QIN Dehong, et al. Cutting of siliceous dolomite by special-shaped PDC cutter under confining pressure [J]. China Petroleum Machinery, 2025,53(6):84-90.
- [38] Detournay E, Atkinson C. Influence of pore pressure on the drilling response of PDC bits [C]//The 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Norman: Permission to Distribute, 1991:ARMA-91-539.
- [39] 陈浩,蒲治成,蔡灿,等.高温损伤岩石高压CO₂射流-PDC齿联合破岩研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(6):1841-1850.
- CHEN Hao, PU Zhicheng, CAI Can, et al. High-temperature treated rock breaking study of PDC teeth assisting with high pressure CO₂ jetting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023,19(6):1841-1850.
- [40] 杨展,方小红,谭松成,等.孕镶金刚石钻头磨损机理研究[J].地质与勘探,2024,60(2):407-413.
- YANG Zhan, FANG Xiaohong, TAN Songcheng, et al. Analysis of the wear mechanism of impregnated diamond bits [J]. Geology and Exploration, 2024,60(2):407-413.
- [41] 李禹霄,张凯,闫晨艳,等.孕镶金刚石钻头高转速钻进磨损失效与规程参数研究现状[J].钻探工程,2023,50(S1):17-25.
- LI Yuxiao, ZHANG Kai, YAN Chenyan, et al. Research status of wear failure and drilling parameters parameters of impregnated diamond bit in high speed drilling [J]. Drilling Engineer-

- ing, 2023, 50(S1): 17-25.
- [42] 陈炼, 魏小虎, 曹强, 等. 凸棱非平面聚晶金刚石齿的破岩机理及在含砾地层中的应用[J]. 中国机械工程, 2024, 35(2): 371-379.
- CHEN Lian, WEI Xiaohu, CAO Qiang, et al. Mechanism of rock breaking by convex non-planar PDC cutter and its applications in gravel-bearing formation[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(2): 371-379.
- [43] Zhao Y, Wen Y M, Gao K, et al. Study on rock-breaking mechanism and bit adaptive characteristics under the action of claw-toe impregnated diamond bit[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 236: 212752.
- [44] Suleiman A, Bailey M J, Qahtani A M, et al. Revolutionizing drilling efficiency in hard and abrasive formations through innovative cutter development and design optimization[C]//International Petroleum Technology Conference. Dhahran: International Petroleum Technology Conference, 2024: IPTC-24145-MS.
- [45] 吴霞. 新场-合兴场区块须家河组难钻地层PDC钻头研制及应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 128-135.
- WU Xia. Development and application of PDC bits for Xujiahe difficult drilling formations in Xinchang-Hexingchang Area[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 128-135.
- [46] 冯云春. 龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 94-101.
- FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 94-101.
- [47] Zhao S, Li C F, Davoodi D, et al. Tribological behavior of PDC-cutter including cemented carbide and polycrystalline diamond composites produced by HPHT for drilling applications[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 123: 106756.
- [48] 杨顺辉, 武好杰, 牛成成, 等. 特种孕镶块加强PDC钻头的研制与试验[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(6): 111-114.
- YANG Shunhui, WU Haojie, NIU Chengcheng, et al. Manufacture and application of PDC bit enhanced by special diamond-impregnated segment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(6): 111-114.
- [49] 吕宪义, 金曾孙, 郝世强, 等. 过渡金属Fe、Ni和Co对金刚石膜表面腐蚀作用的研究[J]. 新型炭材料, 2004(2): 141-144.
- LU Xianyi, JIN Zengsun, HAO Shiqiang. The corrosive effect of transition-metal Fe, Ni and Co on the surface of diamond films[J]. New Carbon Materials, 2004(2): 141-144.
- [50] 谢北萍, 段隆臣, 孟大维. 金刚石钻头钴基胎体材料冲蚀磨损的量化研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(12): 67-69.
- XIE Beiping, DUAN Longchen, MENG Dawei. Research on quantification of erosion-corrosion of co-based matrix material for diamond bits[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(12): 67-69.
- [51] Hincapie-Campos W S, Avellaneda D, Carrillo-Álvarez V M, et al. Evaluation of the wear resistance and electrochemical behavior of drill bits for drilling oil and gas wells[J]. Coatings, 2023, 13(11): 1915.
- [52] 张靖, 周红霞, 李文权. 冷喷涂Ti-Ta-金刚石复合涂层的组织和耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2025, 58(2): 31-41.
- ZHANG Jing, ZHOU Hongxia, LI Wenquan. Research on the microstructure and corrosion resistance of cold-sprayed Ti-Ta-diamond composite coatings[J]. Materials Protection, 2025, 58(2): 31-41.
- [53] 王乃旭. $\text{Mo}_x(\text{TiZrTaW})$ 系高熵合金表面金刚石薄膜的制备与腐蚀行为研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- WANG Naixu. Microstructure and corrosion behaviors of diamond films deposited on $\text{Mo}_x(\text{TiZrTaW})$ high entropy alloys[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [54] 江新洪, 段隆臣, 刘志义. 泥浆对钻头WC基胎体材料冲蚀磨损的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(4): 77-80.
- JIANG Xinhong, DUAN Longchen, LIU Zhiyi. Experimental research on erosion and corrosion of WC-base matrix materials for drill bits under impingement of drilling mud[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(4): 77-80.
- [55] Vega-Ortiz C, Edelman E, Xing P J, et al. Finite element modeling of PDC cutter performance in air drilling applications for geothermal wells[C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Houston: Unconventional Resources Technology Conference, 2025: URTEC-4263775-MS.
- [56] Zhang Z Z, Gao X T, Liu J P, et al. Thermal analysis and thermal-mechanical stress simulation of polycrystalline diamond compact bits during rock breaking process[J]. Coatings, 2026, 16(1): 30.
- [57] Xue T, Zhang K, Wang Y, et al. Tribological behavior of polycrystalline diamond compact in high temperature drilling fluid: revealing the wear-oxidation/corrosion synergistic effect[J]. Diamond and Related Materials, 2026, 163: 113331.
- [58] Wu D Y, Jing M H, Ge D, et al. The role of graded structures in thermal management of PDC cutters under thermo-mechanical coupling[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 292(Part 2): 130225.
- [59] Muhammad Shafiq S A, Syed Muhamad S, Sylvia F, et al. New conical diamond element bit technology coupled with FEA-based modeling for bit selection demonstrates high durability and improved ROP in compact carbonate formation in deep water[C]//International Petroleum Technology Conference. Dhahran: International Petroleum Technology Conference, 2020: IPTC-20202-MS.
- [60] 陈朝然. 坚硬地层钻探用复合超硬材料(PDC)研制及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- CHEN Chaoran. Development and performance study of composite superhard material (PDC) for hard formation drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [61] 张素慧, 王传留, 戴勇波. 温度对不同外形PDC切削齿性能的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 240-245.
- ZHANG Suhui, WANG Chuanliu, DAI Yongbo. Effect of temperature on the performance of PDC cutters with different shape[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(1): 240-245.

(编辑 王跃伟)